

7. Главацкий Г.Д., Филимонов Э.Г. Автономная телевизионная аппаратура для обнаружения лесных пожаров // Лесное хозяйство. – 1997. – № 6. – С.48-49.

8. Оптика – электронные системы экологического мониторинга природной среды: Учеб. пособие для вузов/ В. И. Козинцев, В. М. Орлов, М. Л. Белов и др. Под ред. В. Н. Рождествина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.

9. Пхалагов Ю.А. Сопоставление эмпирических моделей атмосферной дымки и их применимости для расчета ослабления оптической радиации // Распространение оптических волн в неоднородных средах. – Томск: ТГУ, 1983. – С. 140 – 153.

УДК 681.785.5:504.3

Петрук В.Г., Васильківський І.В., Кватернюк С.М. (Україна, Вінниця)

ЛІДАРНИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ АТМОСФЕРИ

Вступ

В даний час на основі застосування лазерів у хімічному аналізі розроблена велика кількість аналітичних методів. Однак, всі вони мають локальний характер, а при використанні локальних методів, що базуються на відборі проб повітря в певних точках атмосферного середовища, виникає багато труднощів, пов'язаних з необхідністю забезпечення мережі постів одночасним відбором проб на різних висотах. При цьому отримані результати вимірів потребують тривалої і трудомісткої обробки в лабораторних умовах. На відміну від локальних аналітичних методів дистанційний лазерний контроль можна охарактеризувати як кількісний і якісний аналіз хімічних або фізичних параметрів атмосферного середовища, коли контролювальний прилад і досліджуваний об'єм просторово розділені.

Фізичні параметри атмосфери

При усередненні параметрів атмосфери об'єм усереднення вибирається із розміром L , що значно

$$L = \frac{b}{gradb}$$

більше характерного масштабу досліджуваного явища: b – досліджувана величина. Такий вибір об'єму усереднення виключає флуктуації обумовлених величин за рахунок теплового руху молекул повітря. Процес осадження в атмосфері врівноважується молекулярною дифузиею [1, 2]. При рівновазі за законом Дальтона парціальні тиски компонентів суміші не залежать один від одного:

$$dP_i = -g\rho_i dh, \quad (1)$$

де P_i – тиск i -го компонента повітря; ρ_i – густина i -го компонента повітря; g – прискорення вільного падіння; h – висота. Повний тиск повітря $P = \sum P_i$. Отже,

$$dP = -g\rho dh. \quad (2)$$

При цьому рівняння стану атмосфери може бути записане у вигляді:

$$P_i = \frac{\rho_i R^* T}{M_i}, \quad (3)$$

де T – температура; R^* – універсальна газова стала; M_i – молярна маса i -го компонента. Середнє значення тиску визначається з рівняння

$$P = \frac{\rho R^* T}{M}. \quad (4)$$

Якщо використати питому газову сталу $R = \frac{R^*}{M}$, то

$$P = R\rho T. \quad (5)$$

Для вологого повітря рівняння стану записується у вигляді

$$P = R\rho T_v, \quad (6)$$

де $T_v = T(1 + 0,608q)$ – віртуальна температура; q – питома вологість повітря.

Трансформація лазерного випромінювання в атмосферному середовищі

Енергетичне послаблення електромагнітного випромінювання атмосферою обумовлено, головним чином, його поглинанням і розсіюванням молекулами газів і різноманітних аерозольних частинок. Закон поглинання Бугера для однорідного стовпа атмосфери описується рівнянням

$$I(l) = I_0 \exp(-\alpha l), \quad (7)$$

де I_0 – початкова інтенсивність випромінювання; $I(l)$ – інтенсивність після проходження деякої відстані; α – коефіцієнт поглинання. При цьому спектральне пропускання атмосфери дорівнює

$$T(\nu) = \frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha l), \quad (8)$$

а спектральне поглинання

$$A(\nu) = \frac{I - I_0}{I_0} = 1 - \exp(-\alpha l). \quad (9)$$

При лазерному зондуванні атмосфери необхідно, щоб довжина хвилі випромінювання лазера відповідала спектральному вікну прозорості атмосфери [3].

Розсіювання оптичних хвиль поділяється на три види: розсіювання Мі, релєївське і комбінаційне. Хоча інтенсивність спонтанного комбінаційного розсіювання (СКР) на два-три порядки менше інтенсивності релєївського розсіювання, використання цього явища перспективно для дистанційної діагностики атмосфери, оскільки інтерпретація даних лазерного зондування в цьому випадку сильно спрощується. Ефективність розсіювання оптичного випромінювання на окремій частинці аерозолі залежить від її відносного розміру в порівнянні з довжиною хвилі λ . Якщо $\rho > 1$, то спостерігається розсіювання Мі, а при $\rho < 0,3 \dots 0,5$ – релєївське розсіювання. Для існування релєївського розсіювання необхідно одночасне виконання двох умов:

$$\rho \ll 1 \quad \text{і} \quad |m\rho| \ll 1, \quad (10)$$

де m – комплексний показник заломлення в речовині частинки. Фізично це означає, що фазовий зсув між зовнішнім полем, яке опромінює частинку, і внутрішнім повинен бути дуже малим. Лінійні розміри частинок аерозолі в атмосфері перебувають у діапазоні $10^{-3} \dots 10^4$ мкм. Тому в загальному вигляді розрахунки взаємодії випромінювання з аерозолем варто проводити з використанням теорії Мі. Слід зазначити, що при розсіюванні випромінювання з довжинами хвиль оптичного діапазону на молекулах повітря (поза резонансами) справедливі умови (10), тобто теорія Релея. Теорія молекулярного розсіювання світла Кабанна - Релея дозволяє записати рівняння для розрахунку коефіцієнта об'ємного розсіювання в газах:

$$\sigma_R(\lambda) = \frac{8\pi^3(m_c^2 - 1)}{3N\lambda^4} \times \frac{6 + 3\Delta}{6 - 7\Delta}, \quad (11)$$

де N – число молекул в одиниці об'єму; m_c – показник заломлення середовища; λ – довжина хвилі випромінювання; Δ – фактор деполаризації розсіяного випромінювання (для молекул повітря $\Delta = 0,035$). Величина $(m_c^2 - 1)$ у чисельнику і $\sigma_R(\lambda)$ пропорційні концентрації молекул N або густині повітря ρ_n . Якщо, відоме значення $\sigma_R(X)$ на якійсь одній довжині хвилі λ_0 при нормальних умовах в атмосфері ($P = P_0$, $T = T_0$), то для інших значень P і T – коефіцієнт $\sigma_R(X)$ визначається за допомогою рівняння

$$\sigma_R(\lambda) = \sigma_{R0}(\lambda_0) \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4. \quad (12)$$

Нормована матриця молекулярного релєївського розсіювання для непоглинаючих газів має вигляд

$$f(\gamma) = \frac{3}{4+3\Delta} \begin{vmatrix} 1 + \cos^2 \gamma + \Delta & -\sin^2 \gamma & 0 & 0 \\ -\sin^2 \gamma & 1 + \cos^2 \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cos \gamma \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Індикатриса молекулярного розсіювання яка описується виразом

$$S(\gamma) = f_{11}(\gamma) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \gamma) \quad (14)$$

симетрична до площини та перпендикулярна напрямку зондуючого світлового променя. Коефіцієнти загального $\sigma_R(\lambda)$ і зворотнього $\sigma_{R,\pi}(\lambda)$ молекулярного розсіювання пов'язані співвідношенням

$$\sigma_{R,\pi}(\lambda) = 0,119\sigma_R(\lambda). \quad (15)$$

При лазерному зондуванні вимірюється інтенсивність випромінювання, розсіяного у зворотньому напрямку. Тому вираз (15) використовується для визначення $\sigma_R(X)$ за виміряним значенням $\sigma_{R,\pi}(X)$ у випадку дистанційного зондування атмосферного повітря [1, 4].

Згідно теорії розсіювання електромагнітних хвиль на аерозольних частинках, формула для розрахунку об'ємного коефіцієнта розсіювання при заданій довжині хвилі має вигляд

$$\sigma_a(\lambda) = N_a \int_0^\infty \pi a^2 K_p(a, m, \lambda) f(a) da, \quad (16)$$

де N_a – число частинок в одиниці об'єму; $K_p(a, m, \lambda)$ – фактор ефективності розсіювання випромінювання на частинках радіусом a , який залежить від довжини хвилі, розміру частинки і її показника заломлення; $f(a)$ – функція розподілу аерозольних частинок по розмірах.

Характеристика систем лідарного контролю атмосфери

При створенні лідарних систем контролю атмосфери може бути використаний метод резонансного розсіювання, що базується на ефектах резонансної взаємодії, при якій частота падаючого на атомні або молекулярні частинки випромінювання дорівнює або близька одній із частот їх власних електронних переходів. Резонансне розсіювання може спостерігатися і на коливальних частотах молекул в ІЧ-області спектра. При цьому існують труднощі інтерпретації результатів вимірювань через перекриття окремих спектральних смуг, які часто мають більшу ширину. Використовуючи ефекти, що супроводжують резонансне розсіювання, можна визначати концентрацію й температуру розсіювальних компонентів атмосфери. При визначенні цим методом характеристик атмосфери застосовують апаратуру, що має оптимальні параметри, та враховують передбачувані ефекти, які виникають при поширенні лазерного випромінювання. При цьому необхідно знати поперечний переріз досліджуваних резонансних реакцій σ_p^2 . Для визначення поперечних перерізів резонансного розсіювання з достатньою точністю можна скористатися виразом

$$\sigma_p^2 = \frac{e^2 f}{4\Delta v \varepsilon_0 m_e c}, \quad (17)$$

де ε_0 – діелектрична стала; e і m_e – заряд і маса електрона; f – сила осцилятора; v – спектральна ширина резонансної лінії за умови $\Delta v > \Delta v_l$; при $\Delta v_l > \Delta v$ у (17) Δv необхідно замінити на лазерну Δv_l .

Спектральна ширина резонансної лінії для верхньої стратосфери і мезосфери буде визначатися доплерівським розширенням. Ефективний поперечний переріз резонансного розсіювання для доплерівського розширення записується у вигляді

$$\sigma_l^0 = 7,5 \times 10^{-3} \frac{f \lambda_0 M^{\frac{1}{2}}}{(2RT)^{\frac{1}{2}}}, \quad (18)$$

де R – газова стала; M – молярна маса. Оскільки енергетичні стани частинок аерозолі квантовані, то в спектрі розсіяного випромінювання, крім частоти падаючого випромінювання з'являються додаткові

складові. Зокрема, спостерігаються дві системи ліній, що симетрично лежать по обидві сторони від частоти збуджуючого випромінювання (стоксові і антистоксові компоненти). Обертання і коливання молекул при розсіюванні призводить до оберальної структури коливальних ліній спонтанного комбінаційного розсіювання (СКР). Ефект СКР полягає в тому, що при розсіюванні випромінювання відбувається поглинання або віддача частини енергії падаючого випромінювання. Оскільки комбінаційний зсув частоти зондуємого випромінювання є характеристикою молекул певного типу, то спектри комбінаційного розсіювання атмосферних газів є основою високочутливого методу визначення їхнього складу. Для малих відстаней контролю, похибка визначення концентрації, обумовлена зміною прозорості атмосфери на довжинах хвиль випромінювання лазера і спонтанним комбінаційним розсіюванням є незначною. При збільшенні траси зондування й погіршенні прозорості атмосфери похибка зростає, і її необхідно враховувати.

Загальна структурна схема лідарної системи контролю представлена на (рис. 1). Всі основні енергетичні, просторово-часові, спектральні і поляризаційні характеристики лазерного випромінювання реалізуються в самому лазері і контролюються на виході за допомогою блоку контролю. Найчастіше такий блок використовується для вимірювання опорного сигналу й вироблення сигналу запуску реєструючої апаратури, яка контролює довжину хвилі лазерного випромінювання. Поширюючись в атмосфері, лазерний промінь частково поглинається і розсіюється. Частина розсіяного назад випромінювання попадає на прийомну антену (телескоп), з неї на фотодетектор (фотоелектронний помножувач (ФЕП)), який перетворює світловий потік у пропорційний електричний сигнал. Відстань до будь-якого досліджуваного об'єму на трасі контролю, визначається за часом, протягом якого світлова хвиля проходить відстань до об'єкта контролю і назад. Інтенсивність прийнятого сигналу залежить від розсіювальних властивостей досліджуваного об'єму, параметрів атмосфери і від характеристик траси зондування атмосфери на шляху від лідара до контрольованого об'єму.

Функціональний зв'язок між параметрами лідара встановлюється рівнянням лазерного зондування

$$P(r) = \eta P_0 A \frac{c\tau}{2} r^{-2} \beta_{\pi}(r') \exp \left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right], \quad (19)$$

де $P(r)$ – потужність ехосигналу; P_0 – потужність зондувального імпульсу; A – площа прийомної антени лідара; r – відстань від лідара до зондувального об'єму атмосфери; c – швидкість світла; τ – тривалість імпульсу; $\beta_{\pi}(r')$ – переріз взаємодії випромінювання у зворотньому напрямку; $\exp \left[-2 \int_0^r \alpha(r') dr' \right]$ – характеристика прозорості атмосфери між лідаром і досліджуваним об'ємом; $\alpha(r')$ – об'ємний коефіцієнт послаблення випромінювання; η – калібрована стала. Вираз (19) записано для однієї довжини хвилі, тому знак λ пропущений.

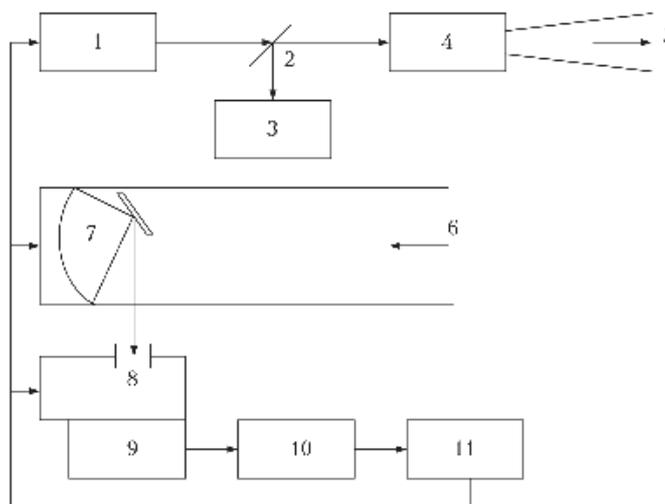


Рисунок 1 – Загальна структурна схема лідарної системи контролю: 1 – лазер; 2 – дільник пучка променів; 3 – блок контролю лазерного випромінювання; 4 – передавальна антена (телескоп); 5 – зондувальний лазерний промінь; 6 – випромінювання, розсіяне назад атмосферою; 7 – прийомна антена (телескоп); 8 – аналізатор спектра або поляризації; 9 – блок детекторів; 10 – комп'ютер із програмним забезпеченням; 11 – система управління і позиціонування лідара.

Визначення концентрації забруднення атмосфери

Високу чутливість виявлення концентрації газових складових атмосфери забезпечують методи, що базуються на поглинанні лазерного випромінювання при пропусканні через досліджуваний газовий об'єм. Для цього випромінювач і приймач розміщують по різні боки газового об'єму. Така система дистанційного контролю не завжди зручна, оскільки елементи лідарної системи розміщуються в різних точках простору. Для вирішення цієї проблеми і створення однопозиційної системи при дистанційному зондуванні може бути використаний відбивач розташований у віддаленій точці.

Значення потужності сигналу, прийнятого на трасі великої довжини, має вигляд

$$P_{off} = \frac{KP_0A}{R^2}; \quad (20)$$

$$P_{on} = \frac{KP_0 \exp \left[-\int_0^R N(r) \sigma dr \right]}{R^2}, \quad (21)$$

де P_{off} і P_{on} – відповідно потужність сигналу, коли частота лазерного випромінювання перебуває поза частотою поглинання і коли збігається із цією частотою; P_0 – випромінювана потужність; A – площа антени; K – ефективність оптичної системи; R – довжина траси; $N(r)$ – густина поглинаючих молекул забруднення як функція відстані; σ – переріз поглинання.

Концентрація забруднюючих речовин визначається за допомогою наступного виразу:

$$\int_0^R N(r) dr = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{P_{off}}{P_{on}}. \quad (22)$$

Розглянутий метод дозволяє визначити інтегральну концентрацію забруднень атмосфери вздовж всієї траси контролю.

Висновок

За допомогою потужних імпульсних перенастроюваних лазерів можна дистанційно в режимі реального часу досліджувати і контролювати малі концентрації забруднень атмосфери на великих відстанях. Лідарні систем контролю мають високу роздільну здатність по дальності і дозволяють визначати концентрацію забруднюючих речовин як функцію розсіювання по розмірам аерозольних частинок забруднення. При необхідності, чутливість цих систем може бути збільшена за умови інтегрування імпульсів лазера і можливості незалежної настройки лазера на резонансну частоту молекул контрольованого типу забруднення.

Отже, якщо відомий спектр випромінювання лазера з достатньою точністю, то поглинання його випромінювання атмосферними газами може бути заздалегідь кількісно визначене для будь-яких реальних умов в атмосфері.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лазерный контроль атмосферы / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979.
2. Инженерная экология: Учебник / Под ред. проф. В.Т.Медведева. - М.: Гардарики, 2002. – 687с.
3. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987.
4. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы Санкт-Петерб.: Гидрометеоздат, 1992.

УДК 681.785.5:504.3

**Іванов А.П., Чайковський А.П. (Білорусь, Мінськ),
Петрук В.Г., Васильківський І.В., Кватернюк С.М. (Україна, Вінниця)**

ЛІДАРНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ АТМОСФЕРИ

Вступ

Розробка методів моніторингу і контролю оптичних, мікрофізичних і метеорологічних характеристик атмосфери має важливе значення для вивчення процесів і складу атмосфери.